УДК 331.45 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-1-26-37

Теоретическое исследование модели движения воздушного потока вблизи фасонного укрытия обдирочно-шлифовального станка

И. С. Купцова
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Рассмотрены проблемы выбора оборудования для эффективного пылеудаления и последующего пылеулавливания. Проанализированы зависимости, описывающие поля скоростей движения потоков в закрытой области абразивного круга, оказывающие влияние на формирование линий тока движения потоков вблизи фасонного укрытия обдирочно-шлифовального станка.
Постановка задачи. Задачей данного исследования является разработка математической и компьютерной модели аспирации обдирочно-шлифовального станка.
Теоретическая часть. Для реализации поставленной задачи использовалось современное программное обеспечение Ansys, а также полученные ранее результаты дисперсного анализа абразивно-чугунной пыли при шлифовании, проведенного при помощи прибора класса High — лазерного гранулометра Analysette 22 Nano Tec.
Выводы. Результаты проведенного анализа, полученные поля и величины скоростей движения потока воздуха в рабочем месте оператора станка в дальнейшем будут сравниваться со скоростями витания различных пылевых частиц, что позволит определить эффективность работы укрытия обдирочно-шлифовального станка, в том числе на стадии проектирования.

Ключевые слова: аспирация, Ansys, пыль, обдирочный станок, компьютерная модель, математическая модель.

***Для цитирования*:** Купцова, И. С. Теоретическое исследование модели движения воздушного потока вблизи фасонного укрытия обдирочно-шлифовального станка / И. С. Купцова // Безопасность техногенных и природных систем. — 2021. — № 1. — С. 26–37. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-1-26-37

Theoretical study of the model of air flow movement near the shaped shelter of the rough grinding machine

I. S. Kuptsova
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The article deals with the problems of choosing equipment for effective dust removal and subsequent dust collection. The dependences describing the fields of flow velocities in the closed area of the abrasive wheel, influencing the formation of streamlines of flow motion near the shaped shelter of the rough grinding machine, are considered.
Problem Statement. The objective of this research is to develop a mathematical and computer model of the aspiration of a rough grinding machine.
Theoretical Part. To accomplish the set task, the modern software Ansys was used as well as the previously obtained results of the dispersion analysis of abrasive-cast iron dust during grinding, which had been carried out using a High-class device — an Analysette22 NanoTec laser granulometer.
Conclusion. The results of the analysis, the obtained fields and the values of the air flow velocities in the workplace of the machine operator will be compared with the hovering rates of various dust particles, which will allow us to determine the efficiency of the rough grinding machine shelter, including at the design stage.

Keywords: aspiration, Ansys, dust, peeling machine, computer model, mathematical model.

***For citation*:** Kuptsova I. S. Theoretical study of the model of air flow movement near the shaped shelter of the rough grinding machine: Safety of Technogenic and Natural Systems. 2021;1:26–37. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-1-26-37

Введение. Для удаления сухих частиц пыли разной дисперсности из-под укрытий технологического оборудования используют аспирацию с пылестружкоприемным и пылеочистным оборудованием, эффективность которого обеспечивается предварительным аэродинамическим расчетом.

Поскольку улавливание пылевых частиц в аспирационных системах и аппаратах пылеочистки характеризуется конкуренцией инерционных и аэродинамических сил, в основу расчета положены физические критерии, составляющие геометрию частиц с их массой.

Для реализации эффективного пылеудаления и последующего пылеулавливания необходимо разработать:

— математическую модель диспергирования абразивно-чугунной пыли при обдирочном шлифовании хрупких деталей;

— математическую и компьютерную модели аспирации обдирочно-шлифовального станка;

— предложить инженерную методику расчёта эффективности работы фасонного укрытия и выбора элементов системы пылеудаления и пылеулавливания для шлифовальных станков рассматриваемого класса.

Ниже представлены математическая и компьютерная модели аспирации обдирочно-шлифовального станка, реализованные в современном программном обеспечении Ansys.

Получены зависимости, описывающие поля скоростей движения потоков в закрытой области абразивного круга, оказывающие влияние на формирование линий тока движения потоков вблизи фасонного укрытия обдирочно-шлифовального станка, что позволит в дальнейшем определить эффективность работы укрытия обдирочно-шлифовального станка, в том числе на стадии его проектирования.

Постановка задачи. В процессе обдирки и шлифования в месте соприкосновения детали и абразивного круга образуется два пылевых потока (факела). Первый поток движется по касательной к окружности абразивного круга (прямой факел), другой поток направлен по ходу вращения самого абразивного круга (обратный факел) (рис. 1). Форма и направление этих пылевых потоков видны по огневым линиям, образующимся при работе шлифовального станка.

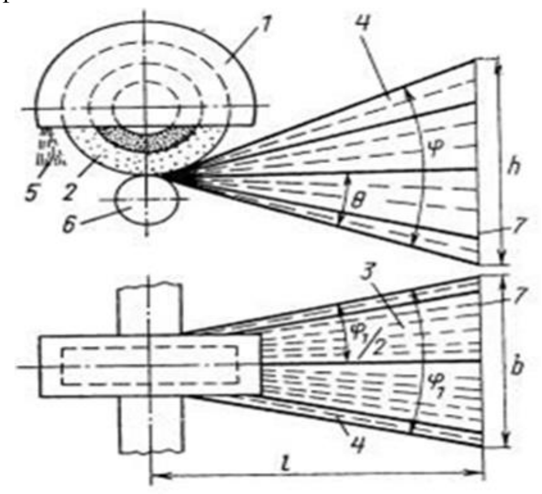


Рис. 1. Пылевые потоки, образующиеся при шлифовании: 1 — кожух, 2 — абразивный круг, 3 — прямой факел, 4 — невидимая часть факела, 5 — обратный факел, 6 — обрабатываемая заготовка, 7 — пылеприемный заборник

При шлифовании без охлаждения основной поток пылевых частиц имеет форму клина и направлен в сторону вращения абразивного круга (рис. 1). Угол клина φ — отклонение основного потока от обрабатываемой поверхности заготовки, он зависит от режимов резания и от физико-механических свойств обрабатываемого материала [1].

Максимальная эффективность пылеулавливания абразивно-металлической пыли при шлифовании может быть достигнута при соблюдении конструктивных особенностей пылеприемника с учетом направления движения пылевых частиц, а также возможности регулирования конструкции пылеприемника при износе абразивного круга. Важно, чтобы пылеприемник был органически связан с защитным укрытием (кожухом) шлифовального станка. Ограждения-пылеприемники с накопителями считаются совершенными, если требуют несколько меньше воздуха для эффективного отсоса пыли за счет использования кинетической энергии отлетающей стружки и пыли (рис. 2) [2–3].

На рис. 2 показаны схема ограждения пылеприемника для шлифовального станка и траектории движения воздушных потоков при аспирации станка.

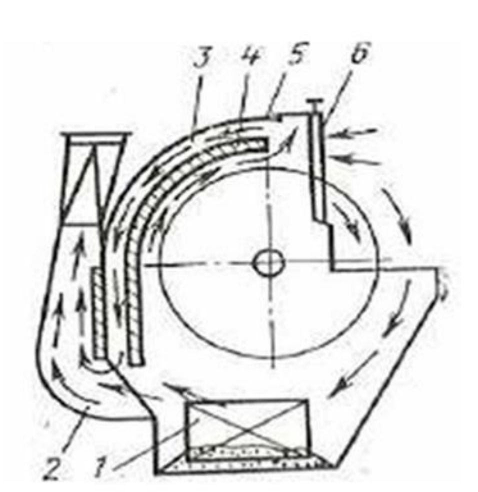


Рис. 2. Схема ограждения пылеприемника для шлифовального станка с накопителем крупной пыли: 1 — накопитель крупной пыли, 2 — отсасывающий патрубок, 3 — канал, 4 — перегородка, 5 — корпус, 6 — заслонка для предотвращения попадания пыли на рабочее место

Эффективность пылеулавливания и безопасность процесса шлифования в значительной степени зависят от конструктивных параметров защитного кожуха-пылеприемника, в том числе от величины зазора между кругом и кожухом.

Защитный кожух должен соответствовать ряду требований:

— материал для изготовления кожуха должен обладать максимальной прочностью, предотвращающей повреждение кожуха при разрыве абразивного круга;

— площадь укрытия абразивного круга должна быть максимальной, но не препятствующей процессу обработки детали;

— возможность регулирования положения кожуха вдоль оси шпинделя, учитывая износ круга;

— применение кожуха в качестве пылезаборника с учетом направления движения пылевых потоков;

— возможность присоединения к кожуху пылеулавливающего устройства в качестве первой ступени очистки [2–3].

Теоретическая часть. Математическая модель взаимодействия воздушных потоков при аспирации обдирочно-шлифовального станка. Краевая задача. В качестве исходных уравнений принимаются система уравнений Навье-Стокса и теплопереноса, а также граничные условия [4–12]. Основными уравнениями процесса взаимодействия вентиляционных потоков являются [4–12]:

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i\right) = 0, \tag{1}$$

где x_i — *i-я* пространственная координата, м;

уравнение моментов (движения):

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i i_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right) + G_i \tag{2}$$

Перенос тепла определяется уравнением:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu \frac{\partial h}{\partial x_i}\right) + Q, \tag{3}$$

где Q — функция источников теплоты, Вт/м^3;

уравнение энергии для расчета температурных характеристик:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{c_p \cdot \partial x_i}\left(k \frac{\partial T}{\partial x_i}\right), \tag{4}$$

где ρ — плотность, P — давление, u_i — компоненты вектора скорости, T — температура, x_i — координаты, μ — вязкость, c_p — удельная теплоемкость, k — теплопроводность, $G_i = -\rho \cdot g_i$ — гравитационная компонента, h — энтальпия.

При использовании моделей турбулентности k-ω уравнения (1)–(2) преобразуются к виду (4), в котором добавлено влияние флуктуации средней скорости (в виде турбулентной кинетической энергии) и процесса уменьшения этой флуктуации за счёт вязкости (диссипации).

Добавляются также два дополнительных уравнения для транспорта кинетической энергии турбулентности и уравнение для скорости диссипации турбулентной энергии (5)–(6).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \bar{u}_i k)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_{k1}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+P_k-\beta'\cdot\rho\cdot k\cdot\omega, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \bar{u}_j \omega)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_{k1}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right)+\alpha_1\cdot\frac{\omega}{k}\cdot P_k-\beta_1\cdot\rho\cdot\omega^2, \quad (6)$$

k-уравнение:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j}=P_k-\rho\cdot C_\mu\cdot k\cdot\omega+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\tilde{\sigma}_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right), \quad (7)$$

ω-уравнение:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j}=\tilde{C}_{\omega 1}\cdot\frac{\omega}{k}\cdot P_k-\tilde{C}_{\omega 2}\cdot\rho\cdot\omega^2+(1-F)\cdot\frac{2\cdot\rho}{\sigma_\omega\cdot\omega}\cdot\frac{\partial k}{\partial x_j}\cdot\frac{\partial \omega}{\partial x_j}+ \\ +\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\tilde{\sigma}_\omega}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right), \quad (8)$$

где, $\tilde{\varphi}=\varphi_1\cdot F_1+\varphi_2\cdot(1-F_1), where \tilde{\varphi}=\tilde{C}_{\omega 1},\tilde{C}_{\omega 2},\frac{1}{\tilde{\sigma}_k},\frac{1}{\tilde{\sigma}_\omega},$

$C_{\omega 11}=0,55; C_{\omega 21}=0,075; \sigma_{k1}=2; \sigma_{\omega 1}=2; C_\mu=0,09$

$C_{\omega 12}=0,44; C_{\omega 22}=0,083; \sigma_{k2}=1; \sigma_{\omega 2}=1,17$

μ_t — коэффициент турбулентной динамической вязкости, k — турбулентная кинетическая энергия (в случае ламинарных потоков k=0).

Граничными условиями для системы уравнений (1)–(8) являются следующие параметры (таблица 1).

Таблица 1

Граничные условия краевой задачи

Скорость: u_i	(9)
Статическое давление на выходе 0 относительно внешнего давления (свободная граница). P=0. Все давления здесь и ниже задаются и получаются в результатах относительно внешнего давления. Для получения полного давления необходимо к данным значениям прибавить атмосферное давление.	(10)
На внутренних стенках условия прилипания, скорости равны 0,0 $u_i = 0$	(11)

Для уравнения энергии (3)–(4) граничные условия задаются в двух вариантах. Тепловой поток на стенках q определяется из формулы:

$$q = h\cdot(T_1 - T_2), \quad (12)$$

где h — коэффициент теплопередачи, T_1 — температура на внешней стенке, T_2 — температура на внутренней стенке.

Температура на внешней стенке T_1 и коэффициент теплопередачи h. Далее краевая задача (3)–(12) может быть решена численно [4–13].

Уравнение состояния для идеального газа соответствует закону Менделеева-Клапейрона, переменная плотность может быть рассчитана исходя из формулы:

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T}, \tag{13}$$

где ρ — плотность воздуха, P — давление, R — газовая постоянная, Дж/(моль·K), T — температура, M — молекулярная масса воздуха (28,966 г/моль).

Зависимость коэффициента вязкости от термодинамических величин устанавливается при помощи кинетической теории. В расчетах для определения коэффициента динамической вязкости используется формула Сазерленда:

$$\mu = \left(\frac{T}{273{,}15}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{273{,}15 + C_S}{T + C_S} \cdot \mu_0, \tag{14}$$

где C_s — константа Сазерленда, μ_0 — коэффициент динамической вязкости при нормальных условиях, кг/м с.

Начальными условиями для системы уравнений (1)–(8) являются: массовый расход воздуха G кг/с на выходе из кожуха, который удаляется от обдирочно-шлифовального станка вентилятором. При этом количество удаляемого воздуха определяется в зависимости от диаметра шлифовального круга $d_{кр}$ по формуле, м^3/ч:

$$L_1 = 1{,}8 \cdot d_{кр}. \tag{15}$$

Формула (15) справедлива при 250 мм<$d_{кр}$ <600 мм. Скорость воздуха определяется из формулы:

$$u_i = \frac{G}{\rho \cdot S}, \tag{16}$$

где ρ — плотность, S — площадь проходного сечения.

Расчетная скорость всасывания воздуха в приемном отверстии кожуха составляет, м/с: $\upsilon_0 = 0{,}25 \cdot \upsilon_{окр}$ — от окружной скорости при направлении факела в приемное отверстие всасывающего воздуховода; $\upsilon_0 = (0{,}3...0{,}4) \cdot \upsilon_{окр}$ — при направлении пылевого факела параллельно всасывающему отверстию присоединенного воздуховода.

Окружная скорость шлифовального круга определяется по формуле:

$$\upsilon_{кр} = \frac{\pi \cdot d_{кр} \cdot n}{60 \cdot 1000}, \tag{17}$$

где n — частота вращения шлифовального круга, выбирается из технических характеристик станка.

На рис. 3 а, б показаны геометрия и расчетная схема исследуемого фасонного укрытия обдирочно-шлифовального станка.

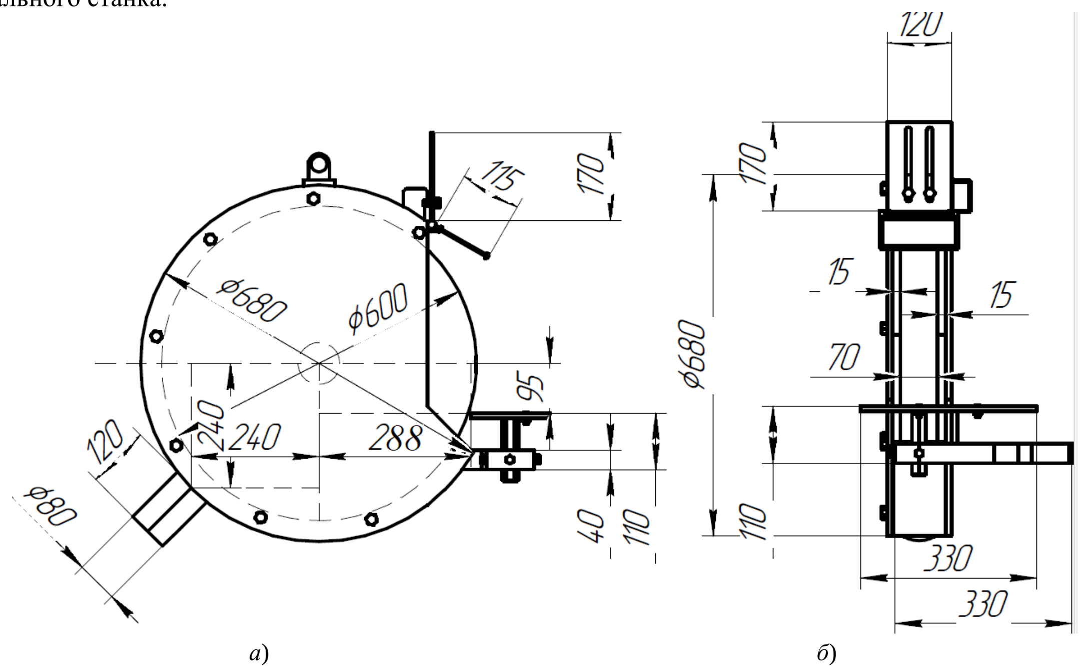
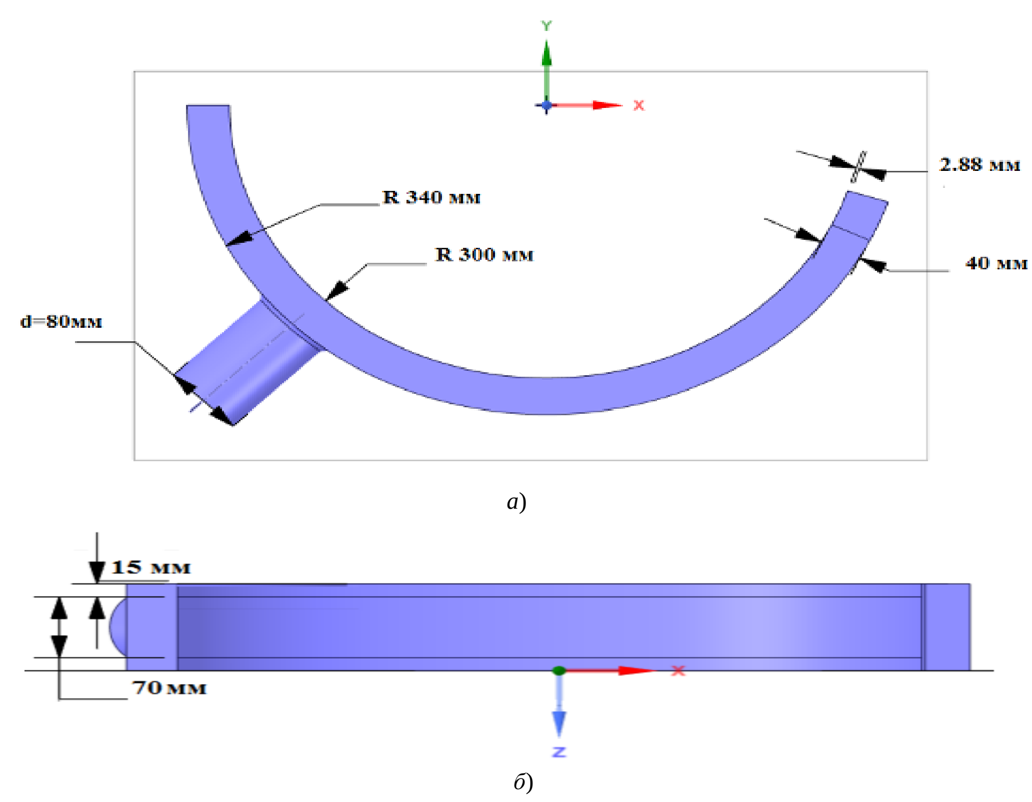


Рис. 3. Принципиальная расчетная схема: а — вид сбоку, б — вид с торца

Компьютерная модель аспирации обдирочно-шлифовального станка.

Постановка задачи. Была создана 3D-модель участка начиная от входа воздуха (места контакта колеса с деталью — образования абразива) до середины шлифовального круга. 3D-модель моделирует внутренний домен воздуха, ограниченный кругом, кожухом, свободными поверхностями (входами и выходами воздуха) (рис. 4 а, б).



а)

б)

Рис. 4. Расчетная область: а — вид сбоку, б — вид сверху

Зазор между внешней поверхностью шлифовального круга и внутренней поверхностью защитного кожуха в первом приближении принят 40 мм.

Данный конструктивный параметр станка может изменяться. На входном отверстии добавлена фаска 5 мм.

Граничные условия:

1. Стенка, условия прилипания (нулевые скорости). На этой поверхности воздух движется со скоростью вращения колеса (таблица 2).

2. Вход потока воздуха со скоростью 30,77 м/с.

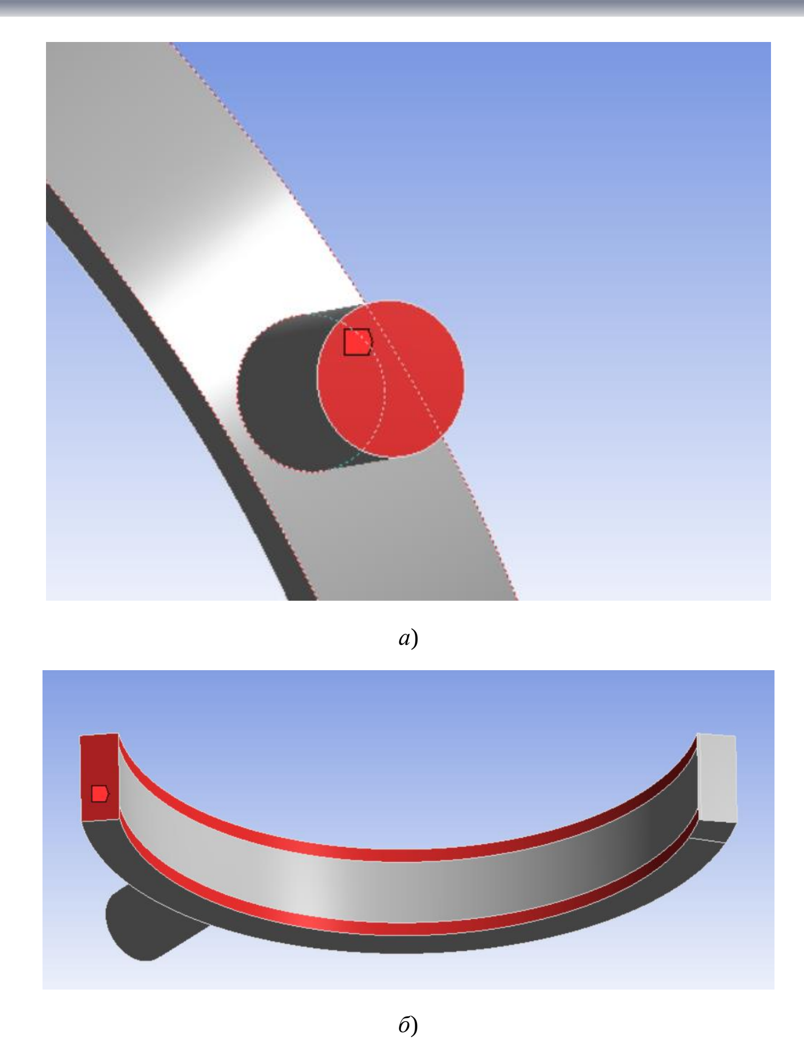
3. Отсос, расход воздуха 1080 $м^3/ч$ (рис. 5 а).

4. Свободные поверхности с нулевым давлением относительно внешнего атмосферного давления. Через эти поверхности может поступать и выходить воздух в зависимости от параметров задачи. Зазор между шлифовальным кругом и кожухом также является свободной поверхностью, который можно изменять (рис. 5 б).

Таблица 2

Расчетные параметры

Название	Величина	Размерность
Плотность воздуха	1,225	$кг/м^3$
Вязкость воздуха	$1{,}7894 \cdot 10^{-5}$	кг/м·с
Скорость вращения колеса	980	об/мин

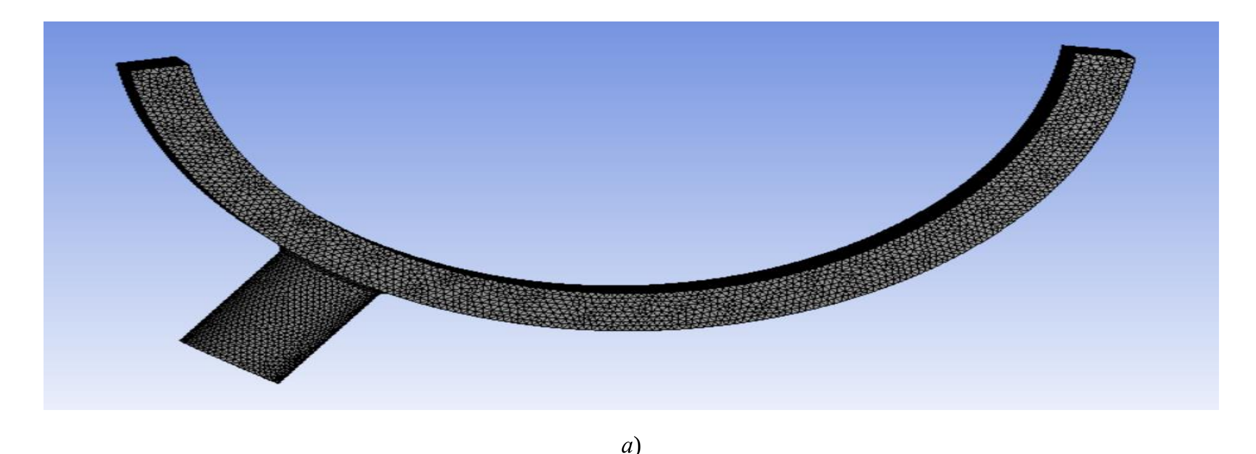


а)

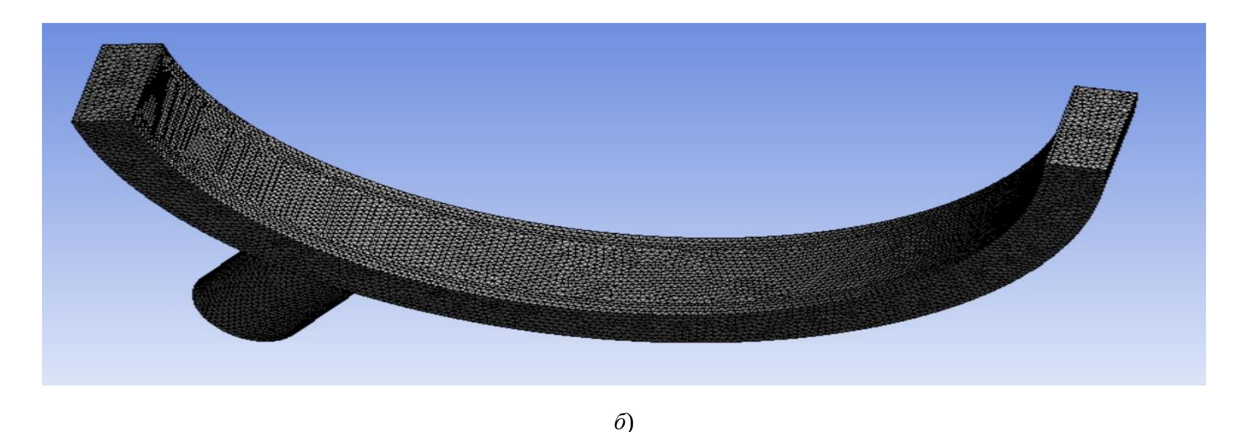
б)

Рис. 5. Граничные условия в модели: а — отсос от станка, расход воздуха 1080 м^3/ч,
б — свободные поверхности с нулевым давлением

Расчетная сетка конечных объемов. Модельные расчеты процессов проводились с разной структурой сетки. Размер расчетной сетки в средних зонах каналов составляет 25 мм. Над внешними границами и в области перехода от кожуха к отсасывающему патрубку выполнено сгущение в виде пристеночных слоев (рис. 6 а, б).



а)



б)

Рис. 6. Сетка конечных объемов: а — вид сбоку, б — вид сверху

В 3D-модели соответствующие границы, отвечающие за граничные условия модели, выделены красным цветом (рис. 5, 7).

Участок на рис. 7 моделирует опору под детали. Для удобства поверхность опоры расположена по радиусу. Поверхность подставки в граничных условиях является граничным условиям стенки, участок между столом и колесом — вход воздуха с соответствующей скоростью, не прикрытая кожухом часть — свободная поверхность для входа-выхода воздуха (отмечена зеленым цветом).

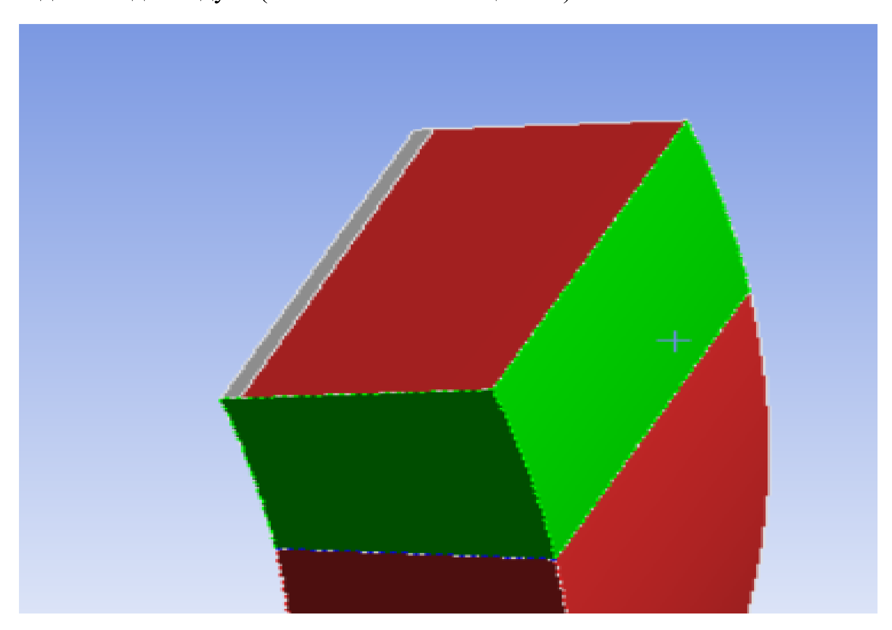


Рис. 7. Модель опоры

Результаты модельных расчетов аэродинамики укрытия. На рис. 8 показано поле скоростей потоков, сформированное при работе вытяжки обдирочно-шлифовального станка. Как видно по результатам расчета, поле крайне неравномерно. Скорости меняются от максимальных 60–80 м/с при входе потоков в отсасывающий патрубок станка до минимальных в пространстве канала между шлифовальным кругом и кожухом [14]. Для более детального понимания картины распределения скоростей потока построим линии скоростей тока (рис. 9–12).

На рис. 9 представлены результаты моделирования движения потоков в пространстве между абразивным кругом и кожухом, а также в цилиндрическом патрубке вытяжки отсоса.

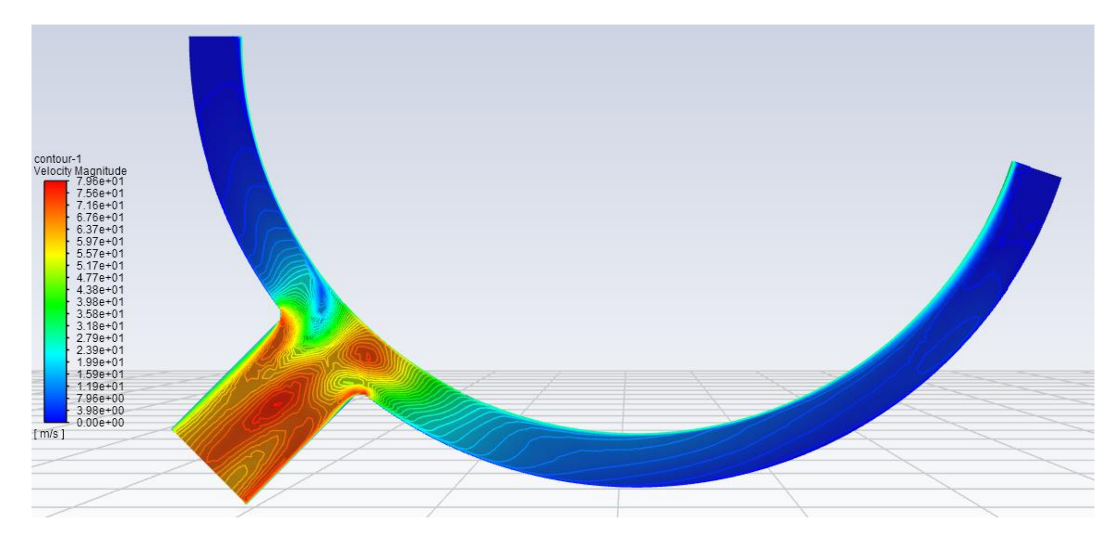


Рис. 8. Поле скоростей потоков в канале

На рис. 9 показаны линии тока скоростей — траектории движения частиц. Цвет отвечает за нумерацию траекторий. Можно видеть, что входная скорость потока воздуха в закрытую часть кожуха станка соответствует величинам 30–34 м/с. На удалении от патрубка вытяжки отсоса, наоборот, формируется обратный поток воздуха с малыми скоростями.

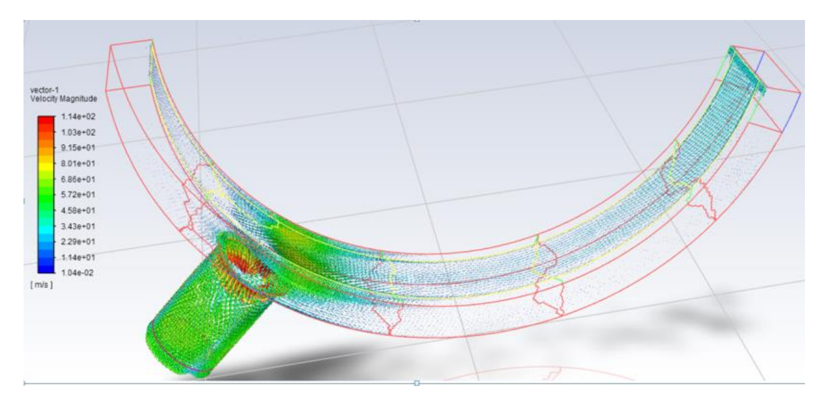


Рис. 9. Изображение векторов скоростей потоков

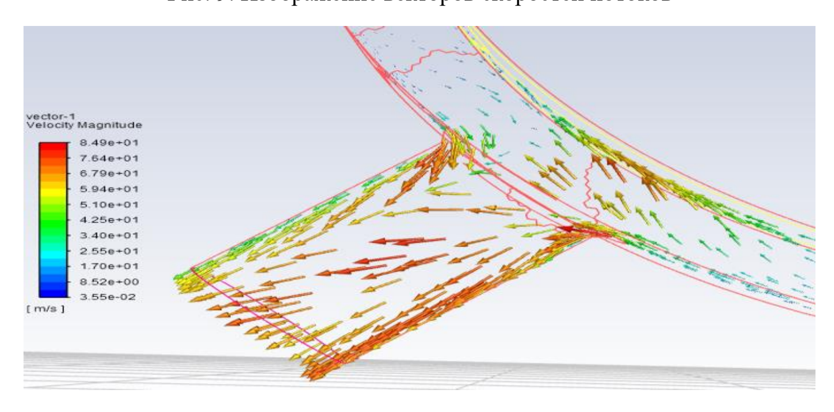


Рис. 10. Численные значения векторов скоростей потоков

Линии тока скоростей — траектории движения предполагаемых частиц пыли. Цвет отвечает за нумерацию траекторий.

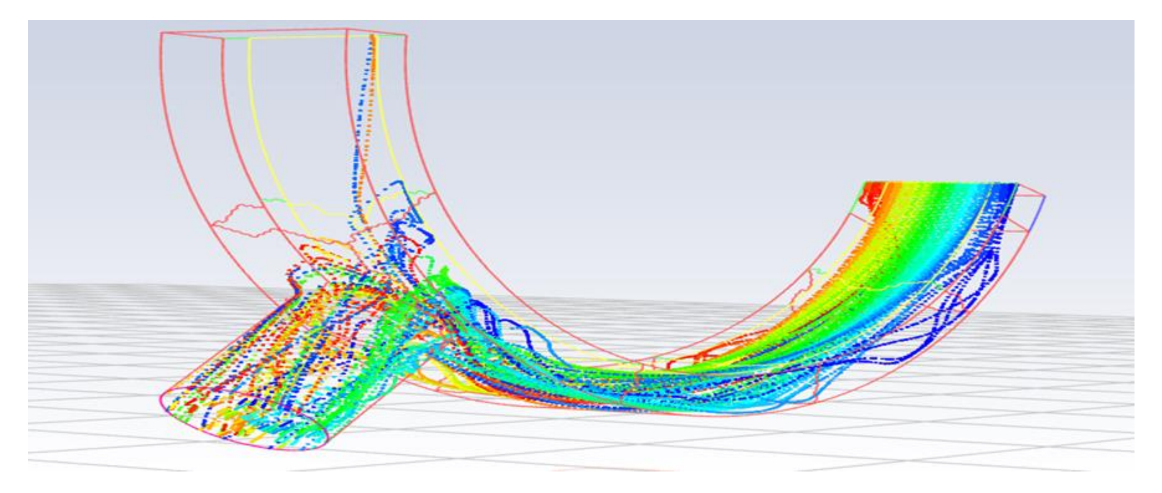


Рис. 11. Изображение линий скоростей тока

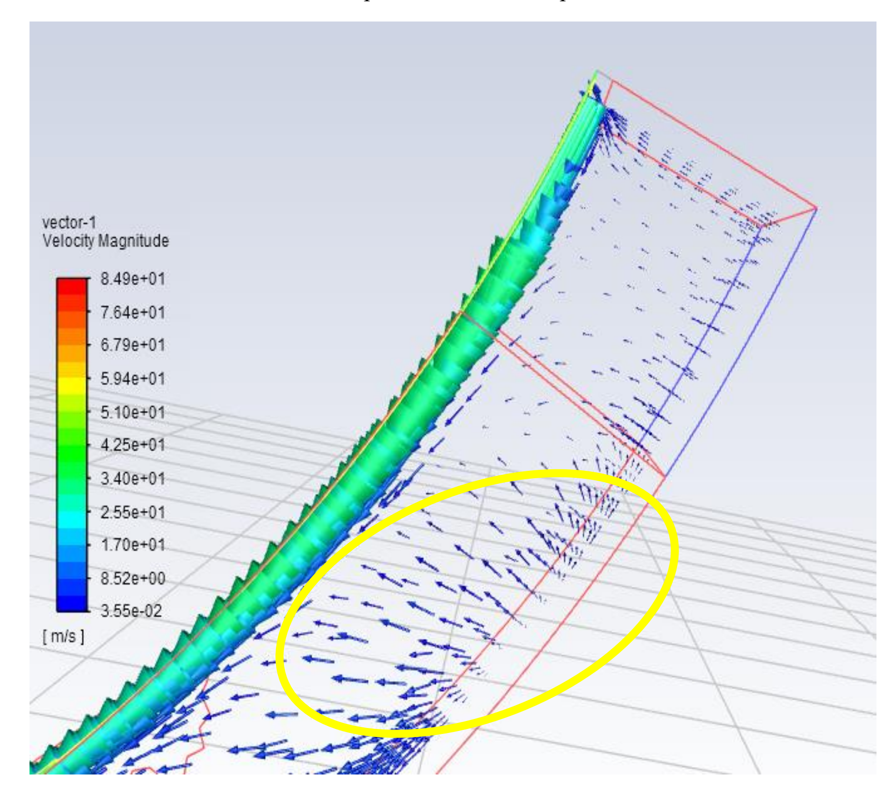


Рис. 12. Изображение завихрений потока воздуха на входе в кожух

Желтым контуром выделены завихрения в начале кожуха, где поток разделяется на разные направления от стенки кожуха.

По результатам расчета CFD, средняя скорость частиц в месте всасывания порядка 60 м/с, но наблюдается более сложная картина распределения градиента скоростей с локальными значениями до 80 м/с.

На рис. 13 представлены векторы скорости движения потока на выходе из кожуха при круглой форме патрубка вытяжки.

Следует отметить, что в непосредственной близости от абразивного круга формируется обратный факел, как на рис. 1, который приводит к выбросу частиц пыли на рабочее место оператора. Скорость этого потока составляет от 0,355 до 1,7 м/с (рис. 13).

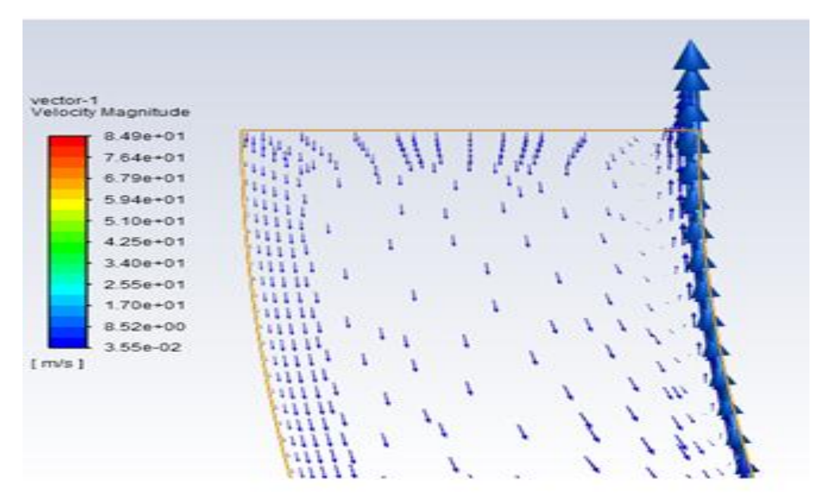


Рис. 13. Величины векторов скоростей прямых и обратных потоков на выходе из укрытия

Заключение. Разработанная компьютерная модель позволила определить поля направленности и величины скоростей движения потоков воздуха в закрытой области абразивного круга и в вытяжном цилиндрическом патрубке, идущем к вентилятору.

Однако для выяснения более полной картины запыленности рабочего места шлифовщика необходимо выяснить, каковы поле линий тока движения потоков и значения величин скоростей в непосредственной близости от фасонного укрытия обдирочно-шлифовального станка, т. е в пространстве, где круг не закрыт фасонным укрытием.

Полученные поля и величины скоростей движения потока воздуха у фасонного укрытия шлифовального станка (в открытой части абразивного круга), т. е. в месте поступления пыли в воздух рабочей зоны в дальнейшем будут сравниваться со скоростями витания различных пылевых частиц, что позволит в конечном счете определить эффективность их улавливания.

Выводы:

1. Разработаны математическая и компьютерная модели аспирации обдирочно-шлифовального станка, реализованные в современном программном обеспечении Ansys.

2. Компьютерная модель позволяет определять рациональное (необходимое минимальное) количество удаляемого воздуха и влияние абразивного износа шлифовального круга на аэродинамические характеристики укрытия шлифовального станка.

3. Получены зависимости, описывающие поля скоростей движения потоков в закрытой области абразивного круга, оказывающие влияние на формирование линий тока движения потоков вблизи фасонного укрытия обдирочно-шлифовального станка, что позволит в перспективе определить эффективность работы укрытия обдирочно-шлифовального станка, в том числе на стадии проектирования.

Библиографический список

1. Кугультинов, С. Д. Технология обработки конструкционных материалов / С. Д. Кугультинов, А. К. Ковальчук, И. И. Портнов. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — С. 268–270.

2. Пасютина, О. В. Безопасность труда и пожарная безопасность при механической обработке металла на станках и линиях : учеб. пособие / О. В. Пасютина. — Минск : РИПО. — 2012. — 108 с.

3. Залаева, С. Ш. Производственная санитария и гигиена труда : уч. пособие в 3 ч. / С. Ш. Залаева, Е. А. Носатова, О. А. Рыбка. — Ч. 2. Вредные вещества. Производственный шум. — Белгород : Из-во БГТУ, 2008. — С. 93.

4. Быков, Л. В. Основы вычислительного теплообмена и гидродинамики / Л. В. Быков, А. М. Молчанов, Д. С. Янышев. — Москва : URSS, 2019. — С. 124.

5. Снегирёв, А. Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений : учеб. пособие / А. Ю. Снегирев. — Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 143 с.

6. Yang, T. S. Two-way interaction between solid particles and homogeneous air turbulence: particle settling rate and turbulence modification measurements / T. S. Yang, S. S. Shy // Journal of Fluid Mechanics. 2005. — Vol. 526, 171–216. DOI: https://doi.org/10.1017/S0022112004002861

7. Weigang Yao, A nonlinear modeling approach using weighted piecewise series and its applications to predict unsteady flows / Yao Weigang, Meng Liou // Journal of Computational Physics. — Vol. 318. — 2016. — P. 58–81. DOI : https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.04.052

8. Matyushenko A. A. Adjustment of the k-ω SST turbulence model for prediction of airfoil characteristics near stall / A. A. Matyushenko, A. V. Garbaruk //Journal of Physics: Conference Series., 18th International Conference Physic A.SPb. — 2016. — Vol. 769. — P. 1–7. DOI : https://doi.org/10.1088/1742-6596/769/1/012082

9. Yoshizawa A. A new methodology for Reynolds-averaged modeling based on the amalgamation of heuristic-modeling and turbulence-theory methods / A. Yoshizawa, S. Nisizima, Y. Shimomura, H. Kobayashi, Y. Matsuo, H. Abe, H. Fujiwara // Journal of Fluids Engineering. —2006. — Vol. 18, Issue 3. DOI : https://doi.org/10.1063/1.2186669

10. Walters, D. K. Three-Equation Eddy-Viscosity Model for Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations of Transitional Flows / D. K. Walters, D. A Cokljat // Journal of Fluids Engineering. —2008. — Vol. 130, Issue 12. — P. 14. DOI : https://doi.org/10.1115/1.2979230

11. Hamlington, P. E. Local and nonlocal strain rate fields and vorticity alignment in turbulent flows / P. E. Hamlington, J. Schumacher, W. J. A. Dahm // Physics of Fluids. — Vol. 77, Issue 2. — 2008. DOI : https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.026303

12. Menter, F. R. The Scale-Adaptive Simulation Method for Unsteady Turbulent Flow Predictions. Part 1: Theory and Model Description / F. R. Menter, Y. Egorov // Flow Turbulence and Combustion. — 2010. —Vol. 85. — P. 113–138. DOI : https://doi.org/10.1007/s10494-010-9264-5

13. Булыгин, Ю. И. Разработка элементов системы нормализации микроклимата в кабине зерноуборочного комбайна Torum / Ю. И. Булыгин, Е. В. Щекина, В. В. Масленский // Безопасность техногенных и природных систем. — 2019. — № 2. — С. 2–12. DOI : https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-2-2-12

14. Булыгин, Ю. И. Проблемы проектирования пылеочистного оборудования в промышленности / Ю. И. Булыгин, Н. Н. Азимова, И. С. Купцова // Безопасность техногенных и природных систем. — 2018. — № 1–2. — С. 2–12.DOI : https://doi.org/10.23947/2541-9129-2018-1-2-2-12

Сдана в редакцию 23.12.2020
Запланирована в номер 27.01.2021

Об авторе:

Купцова Ирина Сергеевна, младший научный сотрудник Центра научных компетенций Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2236-0384, i-kyptsova@mail.ru

Submitted 23.12.2020
Scheduled in the issue 27.01.2021

Author:

Kuptsova, Irina S., Junior Researcher, Center for Scientific Competencies, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2236-0384, i-kyptsova@mail.ru